

文章编号:2095-6134(2021)02-0189-09

# 静电除尘器中的活性炭喷射脱汞数值研究<sup>\*</sup>

冯宇轩,罗坤<sup>†</sup>,樊建人

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室,杭州 310027)

(2019 年 6 月 10 日收稿;2019 年 9 月 5 日收修改稿)

Feng Y X, Luo K, Fan J R. Numerical research on mechanisms of the mercury capture by activated carbon injection within an electrostatic precipitator[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021,38(2):189-197.

**摘 要** 依托 Ansys Fluent 平台及其二次开发程序建立静电除尘器(ESP)内除尘及活性炭汞吸附的数值模型,多场模型耦合了流场、电场、颗粒吸附、颗粒荷电及颗粒运动等子模型,通过该模型对静电除尘器内喷射活性炭汞吸附及颗粒收集的机理和影响因素进行探讨。结果表明活性炭颗粒粒径和 ESP 内的离子风效应对于除汞除尘效率均有重要影响。活性炭颗粒粒径越小,除汞效率越高,当活性炭粒径为 5  $\mu\text{m}$  时,ESP 脱汞效率可达 89.6%。而离子风的作用对于 ESP 内两种汞吸附机制有着不同的影响。其中,在 ESP 内悬浮活性炭颗粒对于汞的吸附机制占主导地位,而近壁面汞吸附效率较低,最大除汞效率不超过 10%。将汞吸附子模型的计算结果与实验结果进行对比验证,发现该模型能较好地预测活性炭的脱汞率。

**关键词** 静电除尘;活性炭;脱汞;吸附机理;数值模型

中图分类号:TK123 文献标志码:A doi:10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2021. 02. 005

## Numerical research on mechanisms of the mercury capture by activated carbon injection within an electrostatic precipitator

FENG Yuxuan, LUO Kun, FAN Jianren

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract** Based on the Ansys Fluent platform along with its secondary development programs, this research developed a comprehensive numerical model for mercury capture by activated carbon injection and particle migration within an electrostatic precipitator (ESP). The multi-field model coupled sub-models such as flow field, electric field, mercury adsorption, particle charging, and particle motion. The mechanisms and crucial operation parameters of mercury adsorption by suspended activated carbon particles in electrostatic precipitators are fully discussed. The results show that both activated carbon particle size and ion wind effects have great impacts on combined removal efficiency of the mercury and particles. Reducing the size of sorbent particles (activated carbon) can promote mercury removal efficiency while decreasing the particle collection efficiency, the mercury removal efficiency will be 89.6% while the particle size is 5  $\mu\text{m}$ . Additionally, the ion wind has distinct effects on the two mercury adsorption mechanisms in an ESP where the adsorption

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(51390493)资助

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: zjulk@zju.edu.cn

mechanism of mercury by suspended activated carbon particles is dominant, while the mercury capture efficiency near the wall is at a low level which is below 9%. The comparison between the experimental data and numerical results demonstrates that this model is able to predict the mercury removal efficiency by powdered sorbent injection with acceptable accuracy.

**Keywords** electrostatic precipitation; activated carbon; mercury removal; adsorption mechanism; numerical model

汞是一种常见的工业原料和产物,具有剧毒性且能在生态系统中进行生物积累,对环境和人体健康有着极大的破坏力<sup>[1-3]</sup>。为限制汞在大气中的排放,2013 年联合国通过了一项具有全球法律约束力的《水俣公约》<sup>[4]</sup>。在《水俣公约》中提到有色金属冶炼和火力发电厂是最重要的汞排放来源。而中国作为燃煤大国,是全球大气汞排放量最多的国家之一,约占全球大气汞排放总量的 33% 左右,并且每年以 4.8% 的速度递增<sup>[5]</sup>,因此中国在新型汞污染排放控制技术的研究上面临十分严峻的挑战。

目前,活性炭喷射除汞技术 (powdered sorbent injection, PSI) 是公认最有潜力的燃煤脱汞技术之一<sup>[6]</sup>。PSI 技术的原理是在除尘设备 (静电除尘器或布袋除尘器) 上游的烟道喷入粉状吸附剂,通常是粉状活性炭颗粒 (pulverized activated carbon, PAC)。在流动过程中,吸附剂颗粒吸附烟气中的汞,将气态单质汞转化为氧化态汞和颗粒状汞,最终通过颗粒去除装置将这些活性炭与汞协同脱除<sup>[7]</sup>。

静电除尘器 (electrostatic precipitator, ESP) 是目前燃煤电厂运用最多的高效除尘设备之一,其基本原理是通过电极高压放电使空气电离,让粉尘颗粒荷电从而在电场力作用下附着到集尘板上<sup>[8]</sup>。由于静电除尘本身是一个较为复杂的多场耦合的气固两相流问题,特别是考虑到颗粒迁移和电动力 (electro hydrodynamic, EHD) 效应的影响,研究 ESP 中汞和吸附剂颗粒同时去除的机理是一项挑战。此前有许多学者利用实验或数值模拟手段研究活性炭喷射脱汞的机理和操作参数的影响,例如周强等<sup>[9]</sup>利用模拟烟气管道喷射脱汞实验平台进行活性炭喷射除汞实验,重点研究活性炭尺寸、烟气温度、汞浓度等因素对汞脱除的影响。任建莉等<sup>[10]</sup>建立活性炭吸附汞的吸附动力学数学模型,并通过模拟烟气吸附实验数据进行拟合得到相应的吸附参数,能有效预测活性炭脱汞的除汞效率。Clack<sup>[11]</sup>利

用数值模拟手段分析在静电力作用条件下活性炭颗粒的迁移和汞吸附机理,但该模型对于非均匀电场及颗粒的微观运动特性无能为力。总的来说,目前人们对于 ESP 中较为复杂的活性炭与汞协同脱除的机理与影响因素仍缺乏足够清晰的认识,也少有相关研究报道。针对此现状本文建立典型 ESP 中的耦合电场、传质及颗粒运动的多场数值模型,并分析在 ESP 内两种不同的汞吸附机制作用下,活性炭颗粒粒径、离子风效应对于汞吸附效率的影响,这对于燃煤电厂选择运行参数,达到最佳脱汞效果,降低脱汞成本有着一定的借鉴意义。

1 数值建模方法

本文建立了 ESP 内部包含流场、电晕电场、离子密度场、颗粒荷电模型以及汞吸附的多场耦合数理模型,由商业软件 ANSYS FLUENT 实现对网格的处理及运算,通过其二次开发功能用户自定义函数 (user defined function, UDF) 和用户自定义标量 (user defined scalar, UDS) 建立统一的对流扩散方程,从而计算得到静电除尘内电场及汞浓度分布。对于活性炭颗粒的运动,采用拉格朗日方法对颗粒的轨迹进行追踪 (考虑库仑力及曳力),颗粒的荷电速率利用 Lawless 和 Sparks<sup>[12]</sup>提出的综合荷电方程来计算。

1.1 气相控制方程

在工业 ESP 中,由于离子风效应的干扰,绝大多数 ESP 内的流场处于紊流状态,只有少数双区 ESP 能达到接近层流状态<sup>[13]</sup>。因此,本文采用雷诺时均湍流模型 (Reynolds average Navier-Stokes, RANS) 对 ESP 内的流场进行数值模拟。对于稳态湍流,控制方程如下:

质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \tag{1}$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_i u_j - (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \quad (2)$$
$$f_{Di} + (\rho_{ion} + \rho_{pc}) E_i,$$

其中： $u_i$  是流体速度在  $x_i$  方向的分量； $\mu_t$  是湍流黏性系数； $f_{Di}$  是颗粒对流体造成的曳力； $\rho_{ion}$ ， $\rho_{pc}$  分别代表离子电荷密度和颗粒电荷密度，二者之和即为空间电荷密度； $E_i$  是电场强度分量； $(\rho_{ion} + \rho_{pc}) E_i$  项代表电场对流场产生的离子风效应。

1.2 电场控制方程

在干式 ESP 中,电晕产生的电场可用泊松方程和电流连续性方程表示:  
泊松方程

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} = - \frac{\rho_{ion} + \rho_{pc}}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}, \quad (3)$$

电流连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [\rho_{ion} (k_{ion} E_i + u_i) - D_e \frac{\partial \rho_{ion}}{\partial x_i}] = 0, \quad (4)$$

$$E_i = - \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}. \quad (5)$$

泊松方程和电流连续性方程可以用如下统一的广义扩散对流输运方程进行表述:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( F_i \Phi - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) = S_\Phi. \quad (6)$$

其中： $\varphi$  为电势； $\varepsilon_0$  为真空介电常数， $\varepsilon_r$  为烟气的相对介电常数，取值分别为  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m 以及 4.0； $k_{ion}$  为离子迁移率，取  $3.0 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/(s·V)； $E_i$  为场强在  $x_i$  方向上的分量； $D_e$  为离子的有效扩散系数，根据工况温度取  $1.02 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s。具体对应项如表 1 所示。

表 1 电势、离子电荷密度及汞浓度的标量输运方程对应项

Table 1 Terms of the scalar transport equations of electric potential, charge density, and mercury concentration

输运方程	$\Phi$	$F_k$	$\Gamma_\Phi$	$S_\Phi$
电势	$\varphi$	0	$\varepsilon_0 \quad \rho_{ion} + \rho_{pc}$	
离子电荷密度	$\rho_{ion}$	$u_k$	$D_e \quad -k_{ion} \left( E_k \frac{\partial \rho_{ion}}{\partial x_k} + \rho_{ion}^2 / \varepsilon_0 \right)$	
汞浓度	$C_{Hg}$	$u_k$	$D_M \quad -\dot{M}_{Hg}$	

表 1 中： $\Phi$  为所研究的标量(电势及离子荷电密度)； $F_i$  为对流通量； $\Gamma_\Phi$  为扩散系数； $S_\Phi$  为源项。电势、离子电荷密度场及汞浓度场通过 Fluent 提

供的 UDS 功能迭代计算。

1.3 颗粒荷电模型

颗粒在电晕场中运动时会带上一定的电量，荷电机制主要分为电场荷电与扩散荷电。粒子的荷电量决定了颗粒所受静电力的大小从而影响到颗粒的运动以及对汞的吸附过程。Long 和 Yao<sup>[14]</sup>指出, Lawless<sup>[12]</sup>提出的综合荷电率模型能够较为准确地计算颗粒在运动过程中的总荷电量:

$$\frac{dq_p}{dt} = \begin{cases} \frac{q_s \left( 1 - \frac{q}{q_s} \right)^2}{\tau} + \frac{2\pi\alpha\rho k_{ion} k_B d_p}{e}, & q < q_s, \\ \frac{\alpha}{4\tau} (q - q_s) \exp \left( \frac{e(q_s - q)}{2\pi\varepsilon_0 k_{ion} k_B T d_p} \right), & q > q_s, \end{cases} \quad (7)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & e_{norm} < 0.525, \\ \frac{1}{(e_{norm} + 0.457)^{0.575}}, & e_{norm} > 0.525, \end{cases} \quad (8)$$

$$e_{norm} = \frac{ed_p}{2k_B T} E, \quad (9)$$

$$\tau = \frac{4\varepsilon_0}{\rho_{ion} k_{ion}}, \quad (10)$$

$$q_s = 3 \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \pi \varepsilon_0 d_p^2 E, \quad (11)$$

其中： $q_s$ 是颗粒的饱和荷电量， $\varepsilon_0$  为真空介电常数， $\varepsilon_r$  是烟气的相对介电常数， $\tau$  是颗粒荷电的时间常数(颗粒荷电量为饱和荷电量一半时所花费的时间)， $k_B$  为玻尔兹曼常数而  $e$  为单位电子的电量。

1.4 颗粒受力模型

在拉格朗日坐标系中,采用 DPM 方法对气相中悬浮粒子进行跟踪。在典型的电除尘器质量加载速率下,气固两相流非常稀薄,颗粒间的相互作用可以忽略不计。Luo 等<sup>[15]</sup>指出,流体拖曳力、Saffman 升力、重力和库仑力是经典静电除尘器中颗粒所受的主要体积力。在目前的分析中,与流体阻力和库仑力相比,Saffman 升力和重力被证明是微不足道的<sup>[16]</sup>。因此,粒子运动方程可以描述为

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c} (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_p) + \frac{q_p \mathbf{E}}{m_p}, \quad (12)$$

其中

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-1.1d_p/2\lambda}), \quad (13)$$

$m_p$  为颗粒质量,  $u_g$  为烟气流速,  $u_p$  为颗粒运动速度,  $C_c$  为康宁汉姆修正系数,  $\lambda$  是空气的平均自由程。式(12)右边的项分别表示流体曳力和库仑力。大约有 1 020 个粒子从 ESP 的入口喷射出来,采用 DPM 方法对气相中悬浮粒子进行跟踪。

1.5 活性炭汞吸附模型

ESP 中喷入的活性炭颗粒对于气相单质汞的吸附主要基于 2 种机制:悬浮颗粒吸附与近壁面吸附<sup>[11]</sup>。有学者分别对 2 种机制对于汞吸附的影响进行过研究,但 2 种机制的综合作用效果和机理尚不明了。在实际工业运用中,由于干式 ESP 的集尘级上覆盖着由活性炭吸附剂与粉尘混合组成的粉尘层,因此在 ESP 中,两种吸附机制是同时作用的。

无论是哪种吸附机制,都包含着复杂的物理吸附与化学吸附过程。活性炭对汞的吸附过程包括 3 个主要步骤:膜传质、颗粒内扩散以及汞在活性点位的吸附<sup>[17]</sup>。通常后两者的发生速率都远快于膜传质过程。基于此,建立吸附模型过程中做如下假设:1)膜传质过程即烟气中气相汞分子向活性炭颗粒表面传递的过程是决定整体吸附速率的步骤;2)忽略颗粒内扩散及活性点位吸附所带来的传质阻力,即将颗粒外表面的汞浓度视为零;3)活性炭颗粒在 ESP 中较短的停留时间里远远达不到吸附饱和状态。

从而可以利用菲克定律计算膜传质的速率:

$$N_A = M \frac{dq_s}{dt} = k_g a (C_g - C_i), \tag{14}$$

其中: $N_A$  为传质速度,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $k_g$  为膜传质系数,  $\text{m/s}$ ;  $a$  为活性炭颗粒的比表面积,  $\text{m}^2/\text{m}^3$ ;  $C_g$  为颗粒外部烟气中气相汞的平均浓度,  $C_i$  为活性炭表面的汞浓度(假设为零),  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

膜传质系数  $k_g$  可由舍伍德数  $Sh$  确定:

$$k_g = \frac{Sh D_M}{d_p}, \tag{15}$$

其中:  $D_M$  为气态汞在空气中的扩散系数;  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $d_p$  为活性炭粒径,  $\text{m}$ 。而舍伍德数  $Sh$  则是谢密特数  $Sc$  与颗粒雷诺数  $Re_p$  的函数:

$$Sh = 2.0 + 0.6 Sc^{\frac{1}{3}} Re_p^{\frac{1}{2}}. \tag{16}$$

通过以上关系式可以得到单个活性炭颗粒吸附气相单质汞的速率,而利用拉格朗日方法追踪活性炭粒子在 ESP 中的轨迹,可以计算出每一个控制体积中的颗粒数量密度,从而得到每一个控

制体积(网格)中单位时间内被吸附的汞单质质量

$$\dot{M}_{Hg} = K_g a (C_g - C^*) = ND_p K_g a (C_g - 0), \tag{17}$$

其中:  $ND_p$  是颗粒数量密度,  $\text{个}/\text{m}^3$ 。而对于近壁面的吸附问题,假设整个收尘板都被活性炭颗粒均匀覆盖,那么在不考虑粉尘层堆积的情况下,可以粗略地认为整个收尘极板表面的单质汞浓度为零,被壁面吸附的汞单质的质量通量通过式(6)的对流扩散方程来计算。在实际中,吸附剂只占粉尘层的一小部分,但考虑到烟尘对于汞单质也有一定的吸附作用,且有研究<sup>[11]</sup>证明采用此假设对于研究近壁面汞单质的相对浓度变化没有太大影响,因此该边界条件不会影响到对于 ESP 内汞吸附机制的研究。

2 物理模型及边界条件

2.1 几何模型建立

在本文中,为简化问题、减少网格量,采用的是二维的线板式 ESP 物理模型,几何结构如图 1 所示。集尘极的总长度为 0.65 m,3 根直径为 5 mm 的圆形电晕极以 0.15 m 的间距等距排列,电晕极与集尘极的距离为 0.1 m。为了在不影响结果的同时降低计算量,以 ESP 水平中心线为轴对称地选取模型的 1/2 作为计算域并划分网格。在整个计算域中生成质量较高的结构化网格,并且由于电晕极周围电场强度梯度较大,对电晕极附近的网格进行加密。此外,考虑到计算结果对网格的独立性要求,对网格无关性进行了检验。用 33 098、62 879、91 645 和 209 811 共 4 种不同网格数量的计算域计算同一工况(393 K,进口流速 1 m/s,颗粒直径 5  $\mu\text{m}$ )下的活性炭除汞效率,分别为 85.9%、89.8%、89.5%和 89.3%。考虑到当网格量大于 62 879 时颗粒收集效率已无显著变化,为了提升计算效率,我们选择的计算域划分网格数量为 62 879 个,如图 2 所示。

2.2 边界条件

在数值计算中运用的边界条件见表 2。除了流场和离散相模型外,数值模型中的电势、离子电荷密度和汞浓度场 3 个标量需要给定边界条件。电晕极表面的电势为运行电压,值得注意的是电晕极表面的离子电荷密度则需要特别的处理,先用 Peek 定律计算得到电晕极的表面场强,随后迭代求解强耦合的离子电荷密度和表面场强,直到

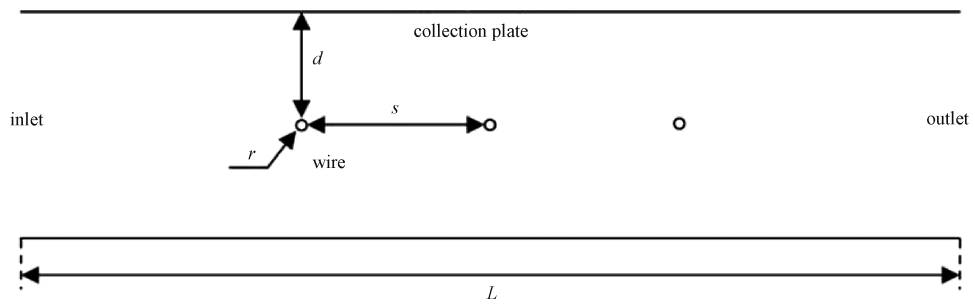


图 1 ESP 几何结构

Fig. 1 ESP geometric construction

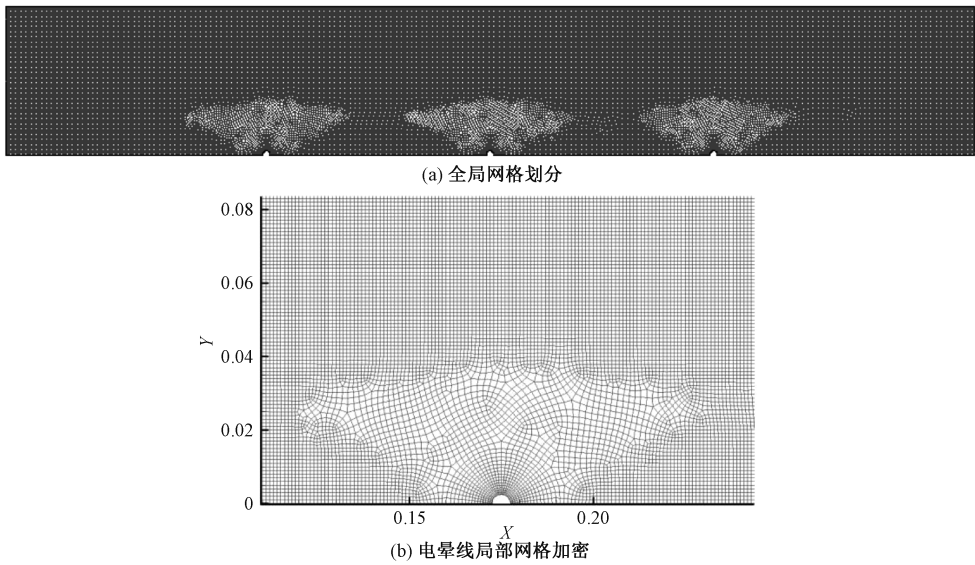


图 2 模型网格划分结构

Fig. 2 The grid scheme of the physical model

得到的表面场强值与 Peek 定律计算得到的场强值相等(一定残差范围内),则认为收敛,取最终的离子电荷密度作为电晕极边界值。收尘板(接

地极)处的电势为 0,离子电荷密度通量为 0,单质汞浓度也为 0。入口和出口的电势、离子电荷密度及单质汞浓度的通量均为 0。

表 2 边界条件

Table 2 Boundary conditions					
	气相	离散相	电势	汞浓度	离子电荷密度
入口	$U_x = U_0$ $U_y = 0$	$U_x = U_0$ $U_y = 0$	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial C_{Hg}}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \rho_{ion}}{\partial n} = 0$
出口	Pressure outlet	Escape	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial C_{Hg}}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \rho_{ion}}{\partial n} = 0$
收尘板	No slip	Trap	$\Phi = 0 \text{ V}$	$C_{Hg} = 0$	$\frac{\partial \rho_{ion}}{\partial n} = 0$
电极线	No slip	Reflect	$\Phi = \varphi_0$	$\frac{\partial C_{Hg}}{\partial n} = 0$	Peek law

### 3 结果与讨论

#### 3.1 模型验证

本文建立 ESP 内活性炭汞吸附的数值模型,由于在工业尺寸 ESP 内进行的活性炭喷射脱汞

测试较少,且相关测试报告也都缺乏所测试 ESP 的几何参数和运行条件,因此为了验证本文所建立汞吸附模型的准确性,将模拟结果与周强等<sup>[9]</sup>的烟道活性炭脱汞实验结果进行对比。虽然该实验是在烟道内而不是 ESP 内进行的,但活性炭脱

汞机理相同。计算区域长 2 m, 内径为 16 mm, 模拟工况为: 烟气温度 120 ℃, 活性炭粒径为 31.5 μm, 喷射量 2.2~6.9 g/h。对两种停留时间下的除汞效率进行对比, 如图 3 所示。

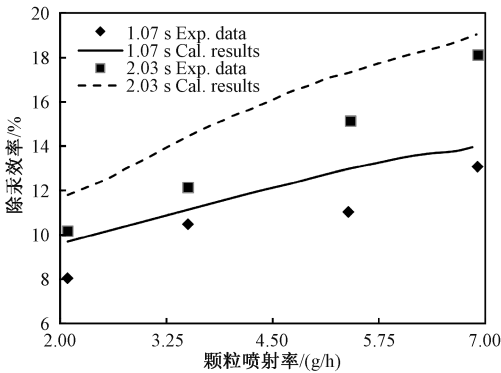


图 3 模型除汞效率与实验结果对比

Fig. 3 Comparison of mercury removal efficiencies between modeling results and experimental data

不难发现, 模拟结果与实验结果在趋势上吻合较好, 除汞效率随着停留时间和活性炭喷射量的提高而提高, 但模拟得到的除汞效率相对实验值都偏高, 最大相对误差值约为 12.1%, 这也是符合预期的。由于在建立除汞模型时便忽略了活性炭颗粒内部的传质阻力, 假设颗粒外表面汞浓度始终为零, 而在实际中活性炭颗粒内部的扩散和吸附速率都是有限的, 尤其是未经过化学改性的活性炭。因此本模型将会高估颗粒吸收的气态单质汞质量, 在相同工况下得到的除汞效率大于实际值。即使如此, 本模型还是能够较好地

表现出 ESP 内不同因素对于除汞效率的影响, 对于研究活性炭除汞的机制有一定的帮助。若在未来的研究工作中, 加入颗粒内部的扩散阻力和化学吸附的影响, 对于提高汞吸附模型的准确度十分有帮助。

3.2 活性炭粒径对汞吸附的影响

在典型的 ESP 运行工况 (即烟气温度 120 ℃, 初始汞浓度为  $1 \times 10^{-8}$  kg/m<sup>3</sup>, 烟气入口速度为 1.0 m/s, 活性炭质量流量为  $2.2 \times 10^{-6}$  kg/s, 电极运行电压为 70 kV) 下, 模拟结果表明, 活性炭粒径对汞吸附有着重要的影响, 如图 4、图 5 所示。值得注意的是, 由于粒径大小对于近壁面汞吸附的影响微乎其微, 在这里只讨论粒径对于悬浮颗粒吸附的影响。随着粒径从 5 μm 增加到 20 μm, 从图 4 可以看出, 活性炭颗粒吸附汞的能力在降低, 且所喷入活性炭颗粒在 ESP 内的吸附范围也在减小。因此活性炭颗粒粒径的增加将会造成 ESP 内汞脱除效率的降低, 图 5 所显示的 ESP 内汞单质平均浓度的变化证实了这一点, 当活性炭粒径为 5 μm 时, ESP 脱汞效率可以达到 89.6%, 而当粒径为 20 μm 时, 脱汞效率急剧下降到 12.3%。当减小活性炭粒径时, 活性炭颗粒的外比表面积增大, 因此在同样的活性炭质量流量下颗粒的表面积更大, 总的传质速率更大。此外, 由式 (7)、式 (8) 及式 (10) 可知, 当颗粒粒径减小时, 颗粒雷诺数和舍伍德数均增大, 膜传质系数  $k_g$  增加, 从而使得颗粒吸附汞的效率显著提升。

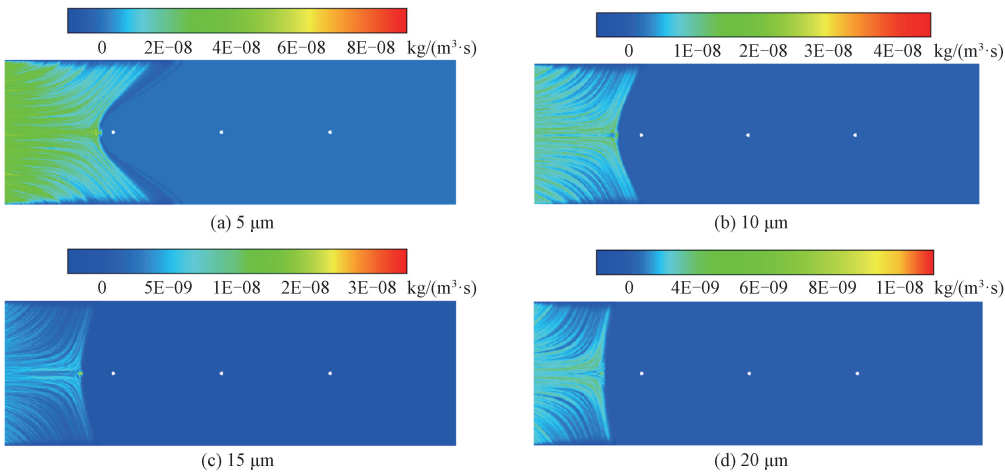


图 4 活性炭颗粒粒径对汞吸附的影响

Fig. 4 Mercury adsorption per unit volume in a unit time for different particle sizes

值得注意的是, 颗粒粒径也对吸附剂在 ESP 内的停留时间有着较大影响, 如图 6 所示。当活

性炭颗粒粒径减小时, 颗粒在 ESP 内的停留时间也随之增加, 这是由于小粒径颗粒受到的静电体

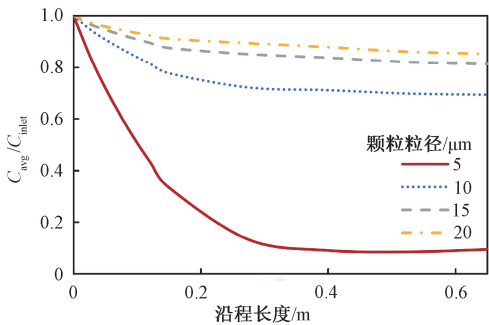


图 5 活性炭颗粒粒径对汞吸附效率的影响

Fig. 5 Average mercury concentration along the downstream direction

积力较小从而其向极板方向的迁移速度较小,因此颗粒在 ESP 内停留时间增加,这意味着烟气汞分子与活性炭发生碰撞而吸附的概率增大,脱汞效率由此得到提高。因此在相同的碳汞比时,使用更小粒径的吸附剂显然会得到更高的脱汞效率。但大幅减少吸附剂颗粒尺寸,会增加吸附剂的生产成本,且 ESP 收集颗粒物的效率是随着粒径减小而下降的,当粒径小于  $2.5\text{ }\mu\text{m}$  时,除尘效率将低于 95%,这将附加地产生许多微颗粒污染物,如  $\text{PM}_{2.5}$ 。因此在选择活性炭粒径时应当平衡好除汞效率与除尘效率,在保证除汞效率的同时不产生额外的颗粒污染物。

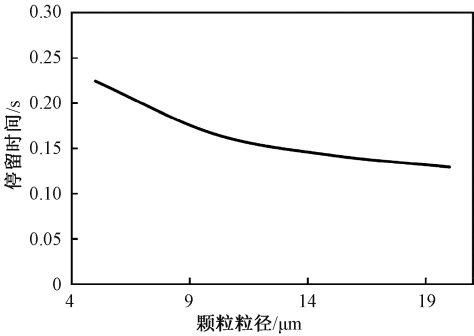


图 6 活性炭颗粒粒径对停留时间的影响

Fig. 6 Variation of residence time with different particle diameters

3.3 离子风效应对汞吸附的影响

离子风 (ionic wind), 又称电晕风 (corona wind)、电风 (electric wind) 或二次流 (second flow)。之所以称为电晕风或离子风,是因为它是电晕放电产生的离子在电场中迁移引起的流动。离子风对于 ESP 内的能量、动量和能量交换有着重要的影响。离子风效应的强弱常用无量纲数  $N_{\text{EHD}}$  来表示:

$$N_{\text{EHD}} = \frac{i}{b\rho u^2} = \frac{\rho_{\text{ion}}E}{\rho u^2/d} = \frac{\text{离子风}}{\text{惯性力}}, \quad (18)$$

式中:  $i$  是单位长度电晕极的电流密度,  $u$  是 ESP 入口处的气体平均速度。可以发现影响  $N_{\text{EHD}}$  大小的主要参数是场强和主流速度的大小,因此通过改变这 2 个参数便能研究不同离子风强度对于汞吸附的影响。本文将分别从悬浮颗粒吸附与近壁面吸附两种机制来阐述离子风对汞吸附的影响。

从图 7 显示的结果来看,离子风效应对于悬浮活性炭颗粒的汞吸附有着重要影响。当运行电压为 70 kV 时,若不考虑离子风效应的影响,即去掉气相动量方程的离子风项  $(\rho_{\text{ion}} + \rho_{\text{pc}})E_i$ , 可以看到悬浮活性炭颗粒吸附汞的效率相比有离子风的条件下降约 2%。说明在 ESP 内离子风的存在能够提升活性炭汞吸附的效率,这是由于离子风能在 ESP 内形成漩涡,漩涡将使湍流强度增加,这对于加强颗粒与气相之间的传质作用是有利的。而当增加 ESP 的运行电压使离子风强度增大时,却发现除汞效率反而降低了,不难得出这是因为电压的增大使得颗粒受到的电场力增加,使得活性炭颗粒很快便被收集到集尘板上,停留时间变短,而湍流强度的增加对传质效率的增加远小于停留时间减小对除汞效率的削弱,因此总的活性炭颗粒除汞效率随着电场强度的增加而减小。这说明想通过提升电场强度来增加脱汞效率是不可行的。

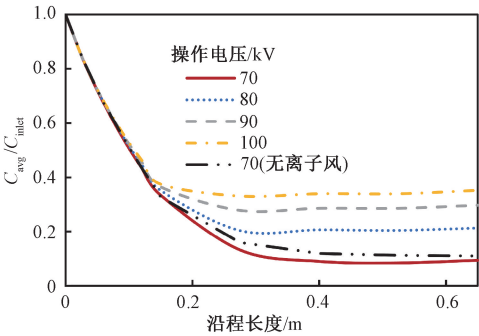


图 7 离子风对颗粒汞吸附效率的影响

Fig. 7 Average mercury concentration along the downstream direction under different EHD conditions

电场强度对于近壁面汞吸附的作用则有所不同。图 8 直观地显示了仅考虑壁面吸附的 ESP 内单质汞浓度分布图。不难发现沿着极板方向形成了汞吸附传质的边界层,且厚度随流动方向而增长。比较 2 种电场强度下气相汞浓度的分布可

以发现,当电场强度增加时,离子风对于边界层的扰动效应增强,使得局部的传质边界层厚度减小,垂直壁面的浓度梯度增大,由菲克定律可知传递向壁面的汞单质质量通量随之增大。如图 9 所示,当运行电压由 70 kV 增大到 100 kV 时,近壁面除汞的效率由 7.77% 增加到 9.92%,这证明了离子风形成的漩涡对于加强集尘板上收集的活性炭颗粒层吸收单质汞有一定的增强作用。而当烟气入口速度减小时,无量纲数  $N_{\text{EHD}}$  增大,离子风效应加强,由图 8(c) 可知,离子风形成的主要漩涡区对应着汞吸附量较大的区域,整体的壁面汞吸附效率提高到 40.4%。因此通过适当减小烟气入口速度能够提高收尘极壁面对汞的吸附量,若考虑悬浮颗粒的吸附,可以预料到的是,随着活性炭颗粒入口速度的减小,在 ESP 内的停留时间增加,因此悬浮颗粒脱汞效率也会增大。从而不难得出结论,适当的减小入口烟气速度能够提高 ESP 中整体的脱汞效率。

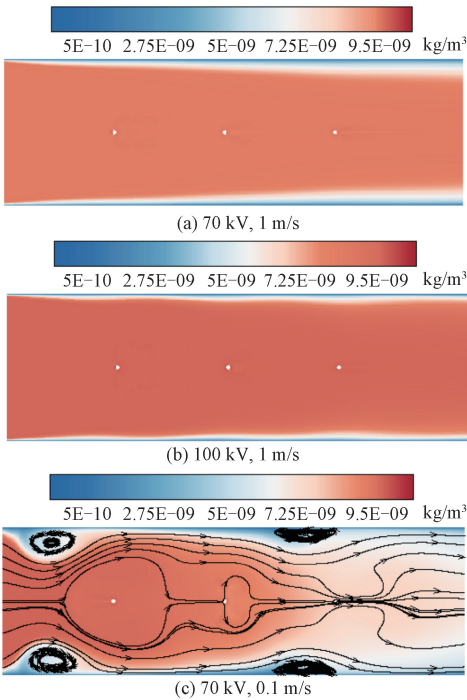


图 8 离子风对近壁面汞吸附的影响

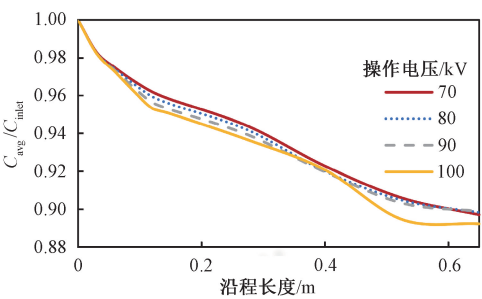


图 9 离子风对近壁面汞吸附的影响

Fig. 9 EHD effects on wall-bounded mercury capture efficiencies

吸附,整体的汞浓度降低,相对于壁面的汞浓度梯度减小,由菲克定律不难得到烟气汞相对于壁面的传质通量将减小,汞吸附量下降。因此可以得出结论,在 ESP 内两种脱汞机制共同作用时,壁面吸附的作用较小,特别是在壁面零浓度条件将高估壁面吸附量的前提下,这与 Clack<sup>[18]</sup> 的模拟结果相同。

表 3 两种吸附机制脱汞效率

Table 3 Removal efficiencies of two mercury adsorption mechanisms %

电压/kV	悬浮颗粒吸附效率	近壁面吸附效率	综合效率
70	89.2	7.77	89.6
80	77.3	8.02	77.9
90	68.7	8.39	69.6
100	62.2	8.92	64.3

4 结论

1) 建立的活性炭喷射脱汞预测模型,能较好地预测活性炭的脱汞率,模型预测的脱汞效率与实验结果具有相同的变化趋势,最大相对误差约为 12.1%;该模型可用于预测 ESP 内烟气喷射活性炭脱汞过程。

2) 减小活性炭粒径,不仅增大活性炭的单位外表面积,而且增大烟气汞向活性炭表面传递的膜传质速率和在 ESP 内的停留时间,提高了喷射脱汞的效率。当活性炭粒径为 5 μm 时,ESP 脱汞效率可以达到 89.6%,而当粒径为 20 μm 时,脱汞效率急剧下降到 12.3%。但过小的吸附剂颗粒尺寸,会增加吸附剂的生产成本,并产生额外的颗粒污染物如 PM<sub>2.5</sub>。

3) 离子风能在 ESP 内形成漩涡,漩涡将使湍流强度增加,这对于加强颗粒与气相之间的传质作用是有利的,即离子风能够提高悬浮活性炭

从表 3 显示的结果可以看出,当悬浮颗粒脱汞与近壁面脱汞两种吸附机制共同作用时,效果要比两种吸附机制单独作用的叠加效果弱,即两种机制共同作用的吸附量要大大小于悬浮颗粒脱汞量与壁面脱汞量之和。这是由于悬浮颗粒吸附效率远大于壁面吸附,因此在活性炭颗粒甫一进入 ESP,大部分的气相汞单质就被活性炭颗粒所

对汞的吸附作用,相较于无离子风条件下能使除汞效率提升 2%。但若通过提升电压的方式来提高离子风强度反而会使除汞效率下降,这与颗粒在 ESP 内停留时间的缩短密切相关。

4) 离子风形成的漩涡同样能提高收尘极壁面对汞烟气的吸附速率,壁面吸附的效率最大可达到 40.4%,但在烟气速度较大的工况下离子风的影响较小。在 ESP 内两种脱汞机制共同作用时,壁面吸附的作用较小,颗粒吸附作用占主导地位。

参考文献

[ 1 ] Hsi H C, Tsai C Y, Kuo T H, et al. Development of low-concentration mercury adsorbents from biohydrogen-generation agricultural residues using sulfur impregnation [ J ]. Bioresource Technology, 2011, 102( 16 ): 7470-7477.

[ 2 ] 杨振宇, 羌宁, 季学李. 美国燃煤电厂锅炉烟气中汞的研究进展 [ J ]. 能源环境保护, 2003, 17( 5 ): 3-7.

[ 3 ] Pavlish J H, Sondreal E A, Mann M D, et al. Status review of mercury control options for coal-fired power plants [ J ]. Fuel Processing Technology, 2003, 82( 2/3 ): 89-165.

[ 4 ] United Nations Environment Programme ( UNEP ). Minamata convention on mercury [ R ]. Geneva, Switzerland: UNEP, 2013.

[ 5 ] Niksa S, Fujiwara N. Estimating Hg emissions from coal-fired power stations in China [ J ]. Fuel, 2009, 88( 1 ): 214-217.

[ 6 ] Lee S H, Rhim Y J, Cho S P, et al. Carbon-based novel sorbent for removing gas-phase mercury [ J ]. Fuel, 2006, 85( 2 ): 219-226.

[ 7 ] 陶叶. 火电机组烟气脱汞工艺路线选择 [ J ]. 电力建设, 2011, 32( 4 ): 74-78.

[ 8 ] While H J. Industrial electrostatic precipitation [ M ]. New York: Addison-Wesley, 1963.

[ 9 ] 周强, 段钰锋, 洪亚光, 等. 模拟烟气活性炭喷射脱汞实验研究 [ J ]. 中国电机工程学报, 2013, 33( 35 ): 36-43.

[ 10 ] 任建莉, 周劲松, 骆仲决, 等. 活性炭吸附烟气中气态汞的试验研究 [ J ]. 中国电机工程学报, 2004, 24( 2 ): 171-175.

[ 11 ] Clack H L. Particle size distribution effects on gas-particle mass transfer within electrostatic precipitators [ J ]. Environmental Science and Technology, 2006, 40: 3929-3933.

[ 12 ] Lawless P A, Sparks L E. Modeling particulate charging in ESPs [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1988, 24: 922-927.

[ 13 ] Li Y, Zheng C H, Luo K, et al. CFD simulation of high-temperature effect on EHD characteristics in a wire-plate electrostatic precipitator [ J ]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23: 633-640.

[ 14 ] Long Z W, Yao Q. Numerical simulation of the flow and the collection mechanism inside a scale hybrid particulate collector [ J ]. Powder Technology, 2012, 215/216: 26-37.

[ 15 ] Luo K, Li Y, Zheng C H, et al. Numerical simulation of temperature effect on particles behavior via electrostatic precipitators [ J ]. Applied Thermal Engineering, 2015, 88: 127-139.

[ 16 ] 毕文剑, 李艳, 罗坤, 等. 温度对静电除尘器内颗粒受力影响的数值模拟 [ J ]. 中国科学院大学学报, 2017, 34( 2 ): 172-178.

[ 17 ] 近藤精一, 石川达雄, 安部郁夫. 吸附科学 [ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 104-107.

[ 18 ] Clack H L. Mass transfer within electrostatic precipitators: in-flight adsorption of mercury by charged suspended particulates [ J ]. Environmental Science and Technology, 2006, 40: 3617-3622.